



## PERPINDAHAN KALOR DALAM ANULUS DENGAN SPIRAL PENGARAH ALIRAN

Janter dan Purnomo

Jurusan Teknik Mesin FT UNIMED Medan

Jurusan Teknik Mesin FT UGM Yogyakarta

Email: purnomo\_tm@yahoo.com

### ABSTRACT

*The aim of the research is to investigate heat transfer on concentric tubes on the influence of spiral airflow by using mass transfer analogy. The spiral airflow in the annulus is guided by a spiral fin fitted on the cylinders. In order to investigate the influence of Reynolds numbers and geometry of the concentric tubes, The Reynolds numbers, the ratio of length to the cylinder diameter ( $L/d$ ), the ratio of outer diameter to inner diameter ( $D/d$ ) and the ratio of spiral pitch to the cylinder diameter ( $p/d$ ) were varied. The mass reduction of the specimens due to sublimation were used for calculating the coefficient of mass transfer and the heat transfer coefficient was estimated from the mass transfer coefficient. The relationship between  $Nu$ ,  $Re$  is  $Nu = 0.489 Re^{0.438} (L/d)^{0.534} (D/d)^{0.95} (p/d)^{-0.45}$*

**Keywords:** heat transfer coefficient, cylinder, spiral airflow.

### LATAR BELAKANG

Kemampuan alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) sangat ditentukan oleh besar kecilnya angka koefisien perpindahan kalor konveksinya. Metoda penentuan angka koefisien perpindahan kalor telah banyak dilakukan, baik dengan cara mengukur suhu permukaan dan laju perpindahan kalor, maupun dengan menggunakan analogi perpindahan kalor dengan perpindahan massa.

J.S Lewis (1971), menggunakan analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa pada aliran sekeliling sebuah silinder naptalen dengan mengukur uap naptalen yang mengalami difusi ke udara yang dilakukan dalam sebuah terowongan angin (*wind tunnel*). Penelitian dilakukan untuk memprediksi perpindahan kalor dari pengukuran perpindahan massa. Nilai pengukuran pada temperatur udara lingkungan, dan hasil pengukuran akan digunakan untuk memprediksi nilai  $Nu$ . Teknik analogi ini sangat sederhana dan telah banyak dilakukan untuk estimasi koefisien perpindahan kalor dari suatu permukaan ke udara seperti yang

dilakukan oleh Rhine, dkk (1991), Keumnam Cho, dkk (1992), Chang Ming Ling, dkk (1994), dan Wu-Shung, dkk. (1995).

Menurut Soerijono, E.P., 2000, koefisien perpindahan kalor dalam anulus akan meningkat bila aliran udara dibuat berbentuk spiral dengan cara membuat sisi masuk membentuk sudut tangensial terhadap silinder. Masalah yang timbul adalah diperkirakan aliran udara hanya berbentuk spiral pada bagian depan silinder sisi masuk, sedangkan pada bagian belakang aliran sudah sejajar dengan silinder. Dengan demikian kecepatan aliran akan turun dan konsekuensinya koefisien perpindahan kalor juga akan turun.

Dalam penelitian ini dilakukan penyelidikan peningkatan koefisien perpindahan kalor pada permukaan silinder didalam aliran udara spiral pada tabung vertikal. Aliran udara dibuat spiral dengan cara membuat pengarah aliran pada sisi dalam tabung. Beberapa variasi dilakukan pada kecepatan aliran udara ( $V$ ), diameter silinder ( $d$ ), panjang silinder dan tabung ( $L$ ) maupun pitch spiral ( $p$ ) yang dibuat dalam rasio  $L/d$ ,  $D/d$ , dan  $p/d$

untuk mendapatkan korelasi bilangan Nusselt dan Reynolds, yang diharapkan dapat mengetahui pengaruh aliran spiral terhadap koefisien perpindahan kalor.

## LANDASAN TEORI

Hubungan perpindahan kalor dengan perpindahan massa dapat diperoleh dengan mengikuti teori Chilton-Colburn (1934):

$$St Pr^{2/3} = St_m Sc^{2/3} \quad (1)$$

Hubungan koefisien perpindahan kalor dengan koefisien perpindahan massa adalah sebagai berikut:

$$h = h_m \rho c_p \left[ \frac{Sc}{Pr} \right]^{2/3} \quad (2)$$

dengan koefisien perpindahan massa dihitung dari:

$$h_m = \frac{\dot{m}}{A \Delta C} \quad (3)$$

dimana:

$\dot{m}$  = laju perpindahan massa (kg/s)

$A$  = luas permukaan ( $m^2$ )

$\Delta C$  = beda konsentrasi uap naptalen ( $kg/m^3$ )

Oleh karena silinder naptalen yang digunakan merupakan silinder panjang, maka untuk mengevaluasi pengaruh beda konsentrasi ( $\Delta C$ ) sepanjang silinder tersebut digunakan metoda LMCD (*log mean concentration difference*) (Treybal, 1981) sebagai berikut:

$$\Delta C_{LM} = \frac{C_{nk}}{\ln \frac{C_{nd}}{C_{nd} - C_{nk}}} \quad (4)$$

$$C_{nk} = C_{nm} + \frac{m}{Q} \quad (5)$$

dimana:

$\Delta C_{LM}$  = beda konsentrasi logaritmis uap naptalin ( $kg/m^3$ )

$C_{nk}$  = konsentrasi uap naptalin pada aliran keluar ( $kg/m^3$ )

$C_{nd}$  = konsentrasi uap naptalin pada dinding tabung ( $kg/m^3$ )

$C_{nm}$  = konsentrasi uap naptalin pada aliran masuk ( $kg/m^3$ )

$Q$  = laju aliran udara ( $m^3/s$ )

$m$  = selisih massa awal dan massa akhir (kg)

Pada awal uji  $C_{nm} = 0$  karena udara di dalam ruang laboratorium diasumsikan bebas dari naptalen. Untuk selanjutnya saluran keluar *blower* dibuat menuju udara bebas agar udara di dalam laboratorium bebas naptalen, atau bisa juga dianggap  $C_{nm} = 0$  karena prosentase naptalen dalam udara yang diserap *blower* sangat kecil sekali dibandingkan dengan volume udara yang ada di dalam ruangan.

Tekanan uap naptalen sebagai fungsi dari temperatur dihitung dengan persamaan yang disarankan oleh Chang Ming Ling, dkk. (1994) sebagai berikut:

$$\log P_{nd} = 13,564 - \frac{3729,4}{T_k} \quad (6)$$

Sedangkan  $C_{nd}$  dihitung mengikuti persamaan gas ideal dan hubungan tekanan uap naptalen seperti yang disarankan oleh Sogin, 1958 (Chang Ming Ling, dkk., 1994) yaitu:

$$C_{nd} = \frac{P_{nd}}{R_n T_k} \quad (7)$$

Angka Schmidt naptalen dihitung dari persamaan (Chang Ming Ling dkk., 1994):

$$Sc = \frac{8,0743}{T_k^{0,2165}} \quad (8)$$

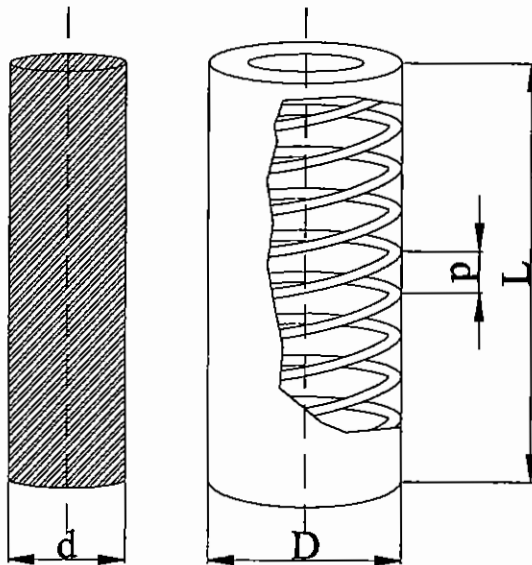
dimana:  $P_{nd}$  dalam  $Nm^{-2}$  dan  $T_k$  dalam Kelvin.

## CARA PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode analogi perpindahan kalor dan massa karena mekanisme perpindahan massa sama dengan perpindahan kalor, dimana benda uji yang digunakan dibuat dari kapur barus (*naphtalene*) yang dibentuk melalui peleburan dan pencetakan berbentuk silinder. Dipilihnya kapur barus ini karena tersedian dalam bentuk padatan di pasaran, dapat menyublim pada temperature ruang serta penguapannya lambat, dan mempunyai kadar racun rendah.

Selisih pengurangan massa benda uji (kapur barus) sebelum dan sesudah pengujian  $m$  dalam jangka waktu tertentu digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan massa, kemudian nilai dipergunakan untuk menghitung koefisien perpindahan kalor.

Untuk mendapatkan aliran udara digunakan blower berkapasitas 4 HP, dan dialirkan melalui pipa-pipa paralon pengujian sebesar 1, 25 inci. Laju aliran dikontrol dengan menggunakan katup udara dan diukur dengan menggunakan rota meter, kemudian dengan menggunakan orifis dan manometer air kecepatan aliran udara masuk anulus dapat diketahui.

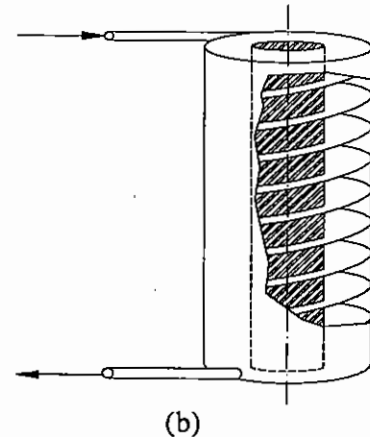
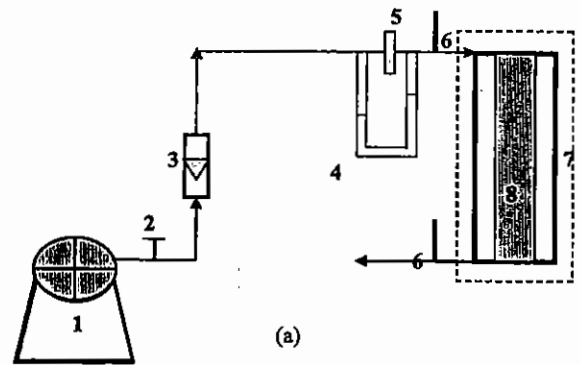


Gambar 1. Geometri silinder dan tabung

Keterangan:

- $L$  = panjang anulus dan silinder
- $D$  = diameter anulus
- $d$  = diameter silinder
- $p$  = jarak antar spiral (dalam meter)

Suhu udara sebelum dan sesudah masuk anulus diukur dengan menggunakan termokopel dan hasilnya dibaca pada thermometer digital, sedangkan massa benda uji sebelum dan sesudah pengujian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital. Untuk mendapatkan aliran udara berbentuk spiral dalam anulus digunakan pengarah aliran dari seng plat, dimana jarak tiap-tiap spiral dapat diubah-ubah. Yang menjadi variable dalam penelitian ini adalah : kecepatan aliran udara ( $V$ ), diameter silinder ( $d$ ), panjang silinder ( $L$ ), jarak antara pengarah aliran ( $p$ ).



Gambar 2. Skema alat penelitian

Keterangan:

- 1. Blower
- 2. Katup
- 3. Rota meter
- 4. Manometer U
- 5. Orifis
- 6. Termokopel
- 7. Tabung
- 8. Silinder

## PEMBAHASAN

Dari data pengukuran dan setelah dilakukan perhitungan, maka hasil penelitian disusun kedalam grafik yang menggambarkan hubungan antara bilangan Nusselt ( $Nu$ ) dengan bilangan Reynolds ( $Re$ ) pada *aspect ratio*  $L/d$ ,  $D/d$ , dan  $p/d$  yang berbeda-beda. Juga digambarkan hubungan antara koefisien perpindahan kalor ( $h$ ) terhadap diameter silinder ( $d$ ), dan terhadap panjang silinder ( $L$ ). Hitungan angka Reynolds dan angka Nusselt dilakukan dengan faktor panjang karakteristik yang diambil, yaitu dengan  $(D+d)/2$ .

$$Re = \frac{\rho V \left( \frac{D+d}{2} \right)}{\mu} \quad \text{dan} \quad Nu = \frac{h \left( \frac{D+d}{2} \right)}{k} \quad (9)$$

Kemudian harga Nu dan harga Re ini akan digunakan untuk menentukan korelasi non dimensional empiris yang menghubungkan Nu dengan Re pada penelitian ini, kemudian akan dibandingkan dengan korelasi empiris yang menghubungkan Nu-Re tanpa menggunakan pengaruh aliran dari penelitian sebelumnya. Setelah dilakukan analisis dimensi dengan metode Pi Buckingham maka bilangan Nusselt merupakan fungsi dari:

$$Nu = Nu \left[ Re, Pr, \left( \frac{L}{d} \right), \left( \frac{D}{d} \right), \left( \frac{p}{d} \right) \right] \quad (10)$$

Diperkirakan korelasinya diberikan oleh persamaan berikut:

$$Nu = q Re^r Pr^s \left( \frac{L}{d} \right)^t \left( \frac{D}{d} \right)^u \left( \frac{p}{d} \right)^v \quad (11)$$

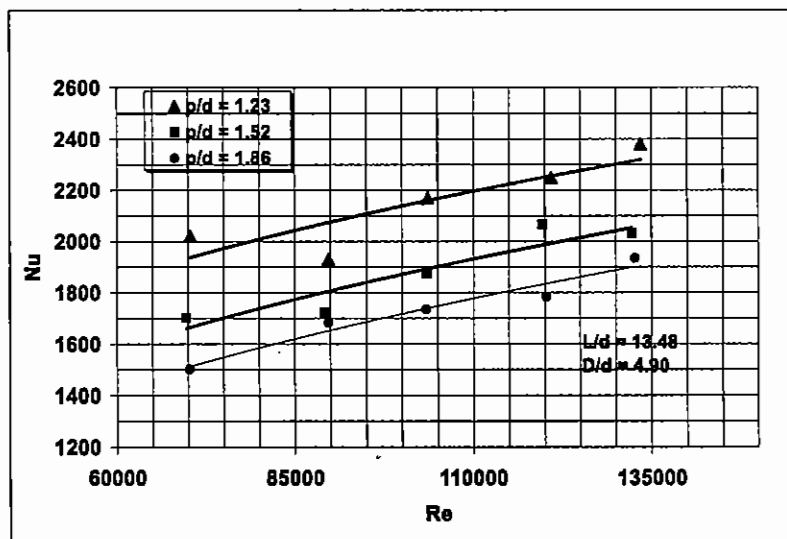
Karena fluida yang digunakan hanya udara dengan temperatur antara 26-34 °C dan pengaruh

Prandtl dapat diabaikan karena perubahannya sangat kecil, sehingga dapat disusun hubungan bilangan Nusselt dengan bilangan Reynolds sebagai berikut:

$$Nu = q Re^r \left( \frac{L}{d} \right)^s \left( \frac{D}{d} \right)^t \left( \frac{p}{d} \right)^u \quad (12)$$

Untuk menentukan konstanta q, r, s, t dan u, digunakan regresi berlipat dengan metode Gaus Seidel. Formulasi empiris antara bilangan Nusselt dan bilangan Reynolds diperoleh dari hasil perhitungan data pengukuran seluruh geometri benda uji.

Gambar (3) sampai dengan Gambar (7) menunjukkan grafik pengaruh variasi jarak spiral (*pitch*) p terhadap Nu yang ditunjukkan dengan variasi p/d dengan L/d dan D/d konstan. Penurunan p/d atau penurunan jarak antar spiral akan meningkatkan koefisien perpindahan kalor dengan meningkatnya nilai Nusselt. Dari gambar terlihat bahwa dengan menggunakan spiral maka grafik akan cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Untuk spiral yang lebih rapat maka kecepatan aliran akan meningkat dan transfer massa akan meningkat pula sehingga pengurangan massa naptalen akan lebih cepat.



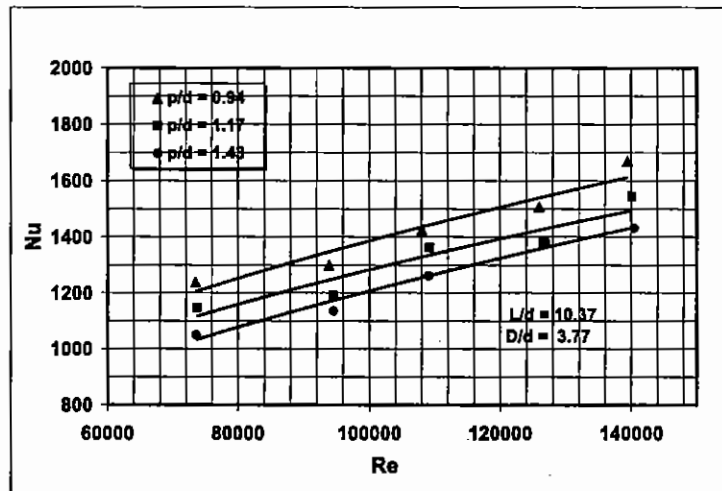
Gambar 3. Pengaruh p/d terhadap Nu untuk variasi p pada L/d = 13.48, D/d = 4.90

Hal ini diakibatkan oleh aliran udara yang tetap dipertahankan berbentuk spiral sepanjang permukaan silinder yang mengakibatkan selisih massa silinder naptalen ( $\Delta m$ ) setelah pengujian lebih besar dibandingkan pada rasio  $p/d$  yang semakin besar artinya jarak spiral makin besar. Pengurangan massa ini dapat dipahami dengan mengingat sifat naptalen yang dapat menguap pada tekanan atmosfer dan besarnya penguapan dapat di ukur setiap saat.

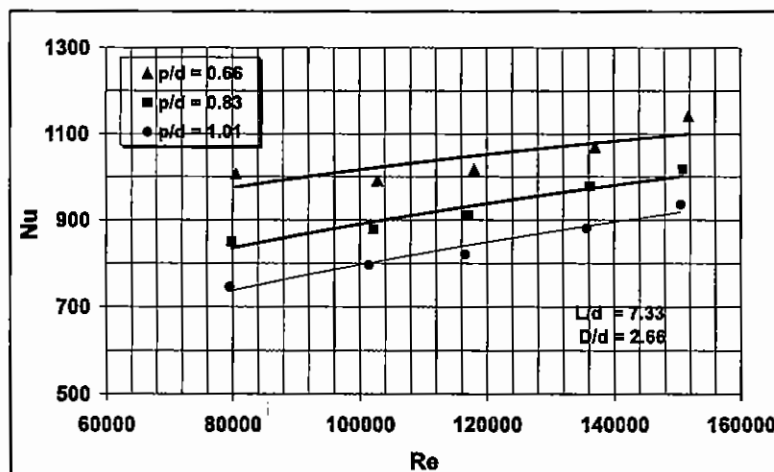
Naptalen itu sendiri mempunyai tekanan uap yang berbeda-beda sesuai dengan temperatur saat dimulainya penguapan. Namun pengaruh suhu disini tidak terlalu dominan untuk variasi jarak spiral karena data menunjukkan bahwa besarnya temperatur yang dicatat adalah sama pada setiap pengujian spesimen dan tidak terlalu dipengaruhi oleh kerapatan spiral pengarah aliran. Jadi pada

rasio  $p/d$  yang semakin menurun mengakibatkan aliran udara yang semakin cepat pada permukaan silinder, hal ini akan mengakibatkan tekanan uap naptalen menurun sehingga beda konsentrasi uap naptalen semakin besar pada  $Re$  yang tertentu yang mengakibatkan semakin banyaknya silinder naptalen yang menguap dan terbawa bersama aliran udara.

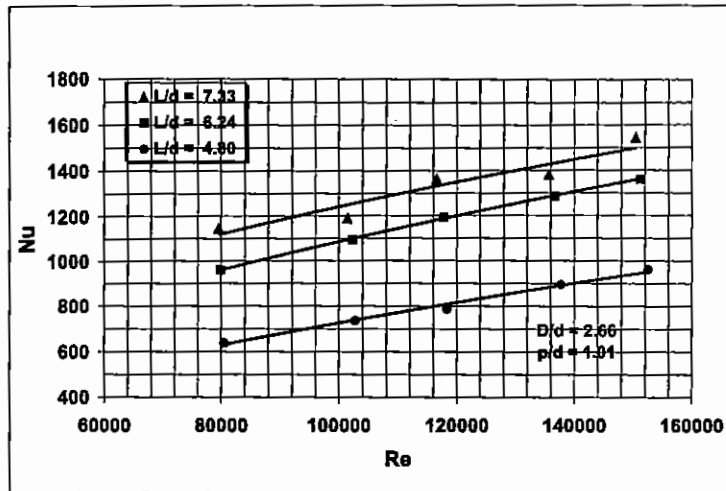
Dapat dilihat bahwa geometri panjang silinder ( $L$ ) sangat berperan dalam perpindahan kalor pada kasus ini, dimana untuk rasio  $L/d$  yang meningkat maka nilai bilangan Nusselt cenderung meningkat dibandingkan dengan rasio  $L/d$  yang menurun. Artinya semakin panjang silinder maka harga bilangan Nusselt juga akan meningkat seiring dengan meningkatnya harga bilangan Reynolds. Gejala ini di luar perkiraan sebelumnya, karena makin ke belakang perpindahan kalor local



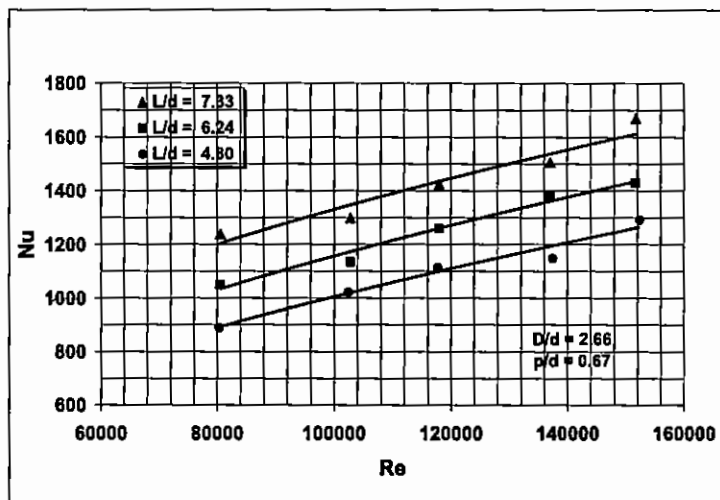
Gambar 4. Pengaruh  $p/d$  terhadap  $Nu$  untuk variasi  $p$  pada  $L/d = 10.37$ ,  $D/d = 3.77$



Gambar 5. Pengaruh  $p/d$  terhadap  $Nu$  untuk variasi  $p$  pada  $L/d = 7.33$ ,  $D/d = 2.66$



Gambar 6. Pengaruh  $L/d$  terhadap  $Nu$  untuk variasi  $L$  pada  $D/d = 2.66$ ,  $p/d = 1.01$



Gambar 7. Pengaruh  $L/d$  terhadap  $Nu$  untuk variasi  $L$  pada  $D/d = 2.66$ ,  $p/d = 0.67$

diperkirakan akan turun karena suhu udara yang meningkat. Dengan demikian koefisien perpindahan kalor rata-rata juga akan turun. Fenomena ini merupakan kasus yang harus diteliti lagi.

Gambar (8) berikut ini akan menunjukkan bahwa harga bilangan Nusselt akan menurun seiring meningkatnya diameter ( $d$ ) silinder naptalen seperti yang terlihat pada penurunan rasio  $D/d$ . Kasus ini juga merupakan tanda tanya. Logikanya jika  $D$  bertambah, luas penampang aliran juga akan bertambah jika variable geometri yang lain konstan. Dengan demikian kecepatan aliran akan turun dan seharusnya perpindahan kalor juga akan turun. Disini pengamatan harus hati-hati, karena di dalam  $Nu$  terdapat variable  $D$  berpangkat satu, sedang di ruas kanan persamaan terdapat  $D/d$  dengan pangkat lebih kecil dari satu. Konsekuensinya, nilai

akan berbanding terbalik dengan  $D$ . Kejanggalan ini kemungkinan dapat dihilangkan dengan kombinasi besaran tak berdimensi yang lebih baik.

Namun dalam kasus ini pengaruh diameter sudah sangat dominan dibandingkan dengan pengaruh kehilangan massa silinder naptalen, artinya pengurangan massa silinder naptalen tidak sebanding lagi dengan diameternya, hal ini akan menimbulkan kejenuhan dalam perpindahan massa sehingga silinder naptalen yang menguap menjadi semakin sedikit dan koefisien perpindahan massa menjadi menurun.

Formulasi empiris antara bilangan Nusselt dan bilangan Reynolds yang diperoleh dari hasil perhitungan pengukuran seluruh geometri benda uji adalah seperti pada persamaan berikut:

$$Nu = 0,489 Re^{0,438} \left(\frac{L}{d}\right)^{0,534} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,95} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0,45} \quad (13)$$

Persamaan regresi yang diperoleh merupakan persamaan baru dengan koefisien korelasi ( $R^2$ ) adalah 0.9982 dan deviasi rata-rata 25,43 %, yang berlaku untuk bilangan Reynolds 65000-155000, dan persamaan ini akan dibandingkan dengan korelasi Nu-Re non dimensional yang telah diperoleh pada penelitian tanpa menggunakan pengarah aliran oleh Soerijono (2000) yaitu,

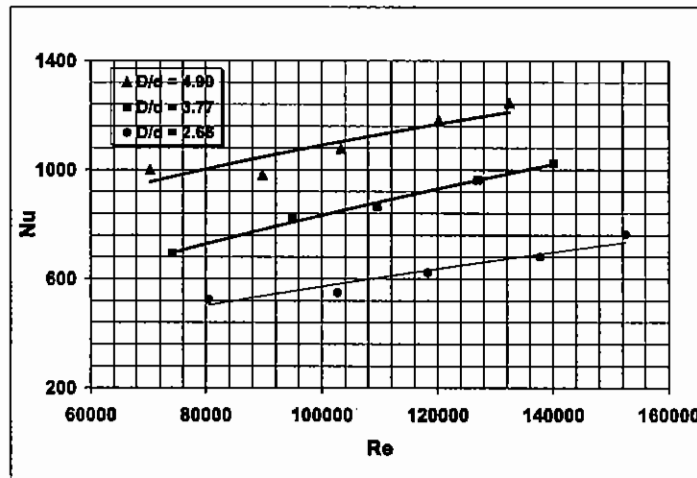
$$Nu = 0.16 Re^{0.52} \left(\frac{L}{d}\right)^{0.56} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.49} \quad (14)$$

Korelasi ini dibandingkan untuk mengetahui berapa besar pengaruh pengarah aliran pada aliran spiral dalam anulus terhadap koefisien perpindahan kalor dengan menggunakan analogi perpindahan kalor dan massa.

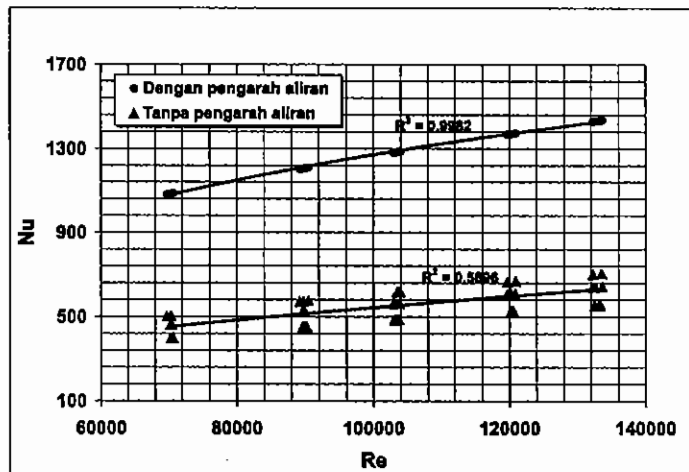
Hasil perbandingan dapat dilihat seperti pada gambar (9) berikut ini, terlihat bahwa untuk geometri benda uji dan bilangan Reynolds yang sama terdapat kenaikan bilangan Nusselt pada kasus menggunakan pengarah aliran dibandingkan dengan tanpa menggunakan pengarah aliran.

Kenaikan bilangan Nusselt ini secara keseluruhan telah dijelaskan diatas melalui grafik-grafik pengaruh diameter ( $d$ ) silinder, pengaruh jarak antar pengarah aliran ( $p$ ), maupun pengaruh panjang ( $L$ ) silinder terhadap bilangan Nusselt.

Pada gambar (9) ini nampak jelas kegunaan spiral pengarah. Koefisien perpindahan kalor jauh lebih besar dibandingkan dengan yang tanpa pengarah spiral. Dengan spiral ini kecepatan alir dipertahankan tinggi sampai ke lubang keluar, dengan demikian perpindahan kalornya juga tetap tinggi.



Gambar 8. Pengaruh rasio  $D/d$  terhadap Nu untuk variasi diameter silinder ( $d$ ).



Gambar 9. Grafik perbandingan Nu-Re dengan menggunakan pengarah aliran dan tanpa menggunakan pengarah aliran (Soerijono, 2000).

## KESIMPULAN

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pengarah menghasilkan koefisien perpindahan kalor ( $h$ ) yang lebih tinggi. Tentunya ini dengan konsekuensi kenaikan *pressure drop*.
2. Nilai koefisien perpindahan kalor meningkat pada  $p/d$  yang semakin menurun,  $L/d$  dan  $D/d$  yang semakin meningkat. Diperoleh korelasi  $Nu$ ,  $Re$  dan geometri silinder-tabung yaitu  $Nu = 0.489 Re^{0.438} (L/d)^{0.534} (D/d)^{0.95} (p/d)^{-0.45}$  dengan koefisien korelasi ( $R^2$ ) yang diperoleh adalah 0.9982 yang berlaku untuk bilangan Reynolds 65000-155000.
3. Kasus peningkatan perpindahan kalor karena kenaikan rasio  $L/d$  perlu dievaluasi lagi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chang-Ming Ling, Yuan-Yue Jin, and Zhong-Qi Chen, 1994, *Heat/Mass Transfer and Pressure Drop in Triangular – Rib – Roughened Rectangular Channel*, Int. Journal Heat and Fluid Flow, Vol. 15, No. 6, hal. 486 – 490.
- Cho, K., Thomas F. Irvine, JR., and Jacob Karni, 1992, *Measurement of Diffusion Coefficient of Naphthalene into Air*, Int J. Heat Transfer, Vol. 35, No. 4, hal. 957 – 966.
- Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 1981, *Fundamentals of Heat Transfer*, Ed. 2, John Wiley & Sons, New York.
- Nassif, Naji J., Janna, William S., Jakobowski, and Gerald S., 1995, *Mass Transfer from a Sublimating Naphthalene Flat Plate to a Parallel Flow of Air*, Int. J. Heat-Mass Transfer, Vol. 38, No. 4, hal. 691 – 700.
- Rhine, J.M. and Tucker, R.J., 1991, *Modelling of Gas Fired Furnaces and Boilers*, ed. 1, McGraw Hill Book Co., London.
- Soerijono, E.P., 2000, *Analisis Perpindahan Kalor Pada Permukaan Silinder di Dalam Aliran Spiral Menggunakan Analogi Perpindahan Massa*, Tesis S-2, UGM, Yogyakarta.
- Treybal, R.E., 1985, *Mass – Transfer Operation*, ed. 3, McGraw Hill Book Co., London.
- Wu-Shung Fu, Ching-Chi Tseng, and Chih-Shung Huang, 1995, *Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement of an Outer Tube with an Inner – Tube Insertion*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 18, hal. 3443 – 3454.